

Zirconium alloy nuclear fuel cladding production

Patent Number: FR2769637

Publication date: 1999-04-16

Inventor(s): ISOBE TAKESHI; SUDA YOSHITAKA

Applicant(s): MITSUBISHI MATERIALS CORP (JP)

Requested Patent: FR2769637

Application Number: FR19980012784 19981013

Priority Number(s): JP19970278935 19971013; JP19980287800 19981009

IPC Classification: C21D8/00 ; C21D1/26 ; G21C3/07

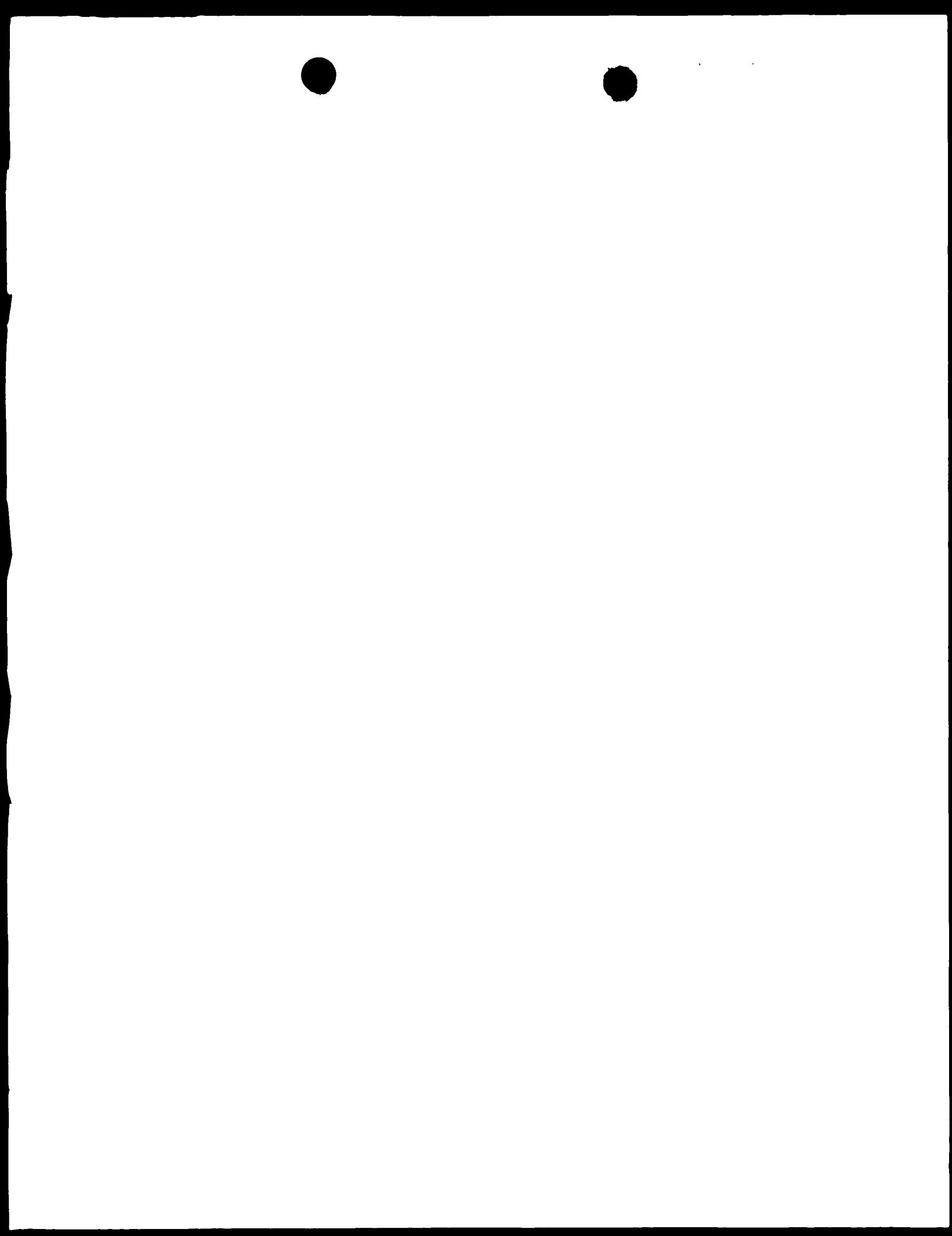
EC Classification: G21C3/07

Equivalents: JP11194189

Abstract

In the production of nuclear fuel cladding of a zirconium alloy containing Nb or Nb+Ta, annealing is carried out at 550-850 deg C for 1-4 h such that the log of the cumulative anneal parameter is -20 to -15 and satisfies a mathematical relationship relating it to the Nb or Nb+Ta content. Nuclear fuel cladding is produced by subjecting a zirconium alloy of composition (by wt.) 0.2-1.7% Sn, 0.18-0.6% Fe, 0.07-0.4% Cr, 0.05-1.0% Nb, optionally 0.01-0.1% Ta, balance zirconium and impurities, including <= 60 ppm N, to hot forging, solution heat treatment, hot extrusion, repeated annealing and cold rolling, and final stress relief annealing, the annealing being carried out at 550-850 deg C for 1-4 h such that the cumulative anneal parameter $\lambda = SA_i$ (where $\lambda = SA_i = \lambda = Sti \text{ asterisk} \exp(-40000/Ti)$) satisfies the relationships of $\log \lambda = SA_i = -20$ to -15 and $\log \lambda = SA_i = -18-10XNb$ to $-15-3.75(XNb-0.2)$, $\langle \#s \rangle$ in which $A_i = \text{anneal parameter for the } i\text{th anneal}$, $t_i = \text{anneal duration (h) for the } i\text{th anneal}$, $T_i = \text{the anneal temperature (K) for the } i\text{th anneal}$ and $XNb = \text{the Nb and optional Ta content (in wt. \%)}$. An Independent claim is also included for a zirconium alloy nuclear fuel cladding made by the above process.

Data supplied from the **esp@cenet** database - I2



(19) RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

(11) N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 769 637

(21) N° d'enregistrement national : 98 12784

(51) Int Cl⁶ : C 21 D 8/00, C 21 D 1/26, G 21 C 3/07

(12)

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

(22) Date de dépôt : 13.10.98.

(30) Priorité : 13.10.97 JP 27893597 09.10.98 JP
28780098.

(71) Demandeur(s) : MITSUBISHI MATERIALS CORP —
JP.

(43) Date de mise à la disposition du public de la
demande : 16.04.99 Bulletin 99/15.

(56) Liste des documents cités dans le rapport de
recherche préliminaire : Ce dernier n'a pas été
établi à la date de publication de la demande.

(50) Références à d'autres documents nationaux
apparentés :

(72) Inventeur(s) : ISOBE TAKESHI et SUDA YOSHI-
TAKA.

(73) Titulaire(s) :

(74) Mandataire(s) : REGIMBEAU.

(54) PROCÉDÉ POUR FABRIQUER UN ALLIAGE DE ZIRCONIUM POUR GAINAGE COMBUSTIBLE DE RÉACTEUR
NUCLEAIRE AYANT UNE EXCELLENTE RÉSISTANCE À LA CORROSION ET DES PROPRIÉTÉS DE FLUAGE.

(57) L'invention fournit un procédé pour fabriquer un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réacteur nucléaire ayant une excellente résistance à la corrosion et d'excellentes propriétés de fluage. Le procédé consiste à réaliser un forgeage à chaud, un traitement thermique en solution, une extrusion à chaud, et des cycles répétés de recuit et de laminage à froid d'un alliage de Zr ayant une composition pondérale de 0, 2 à 1, 7 % de Sn, 0, 18 à 0, 6 % de Fe, 0, 07 à 0, 4 % de Cr, 0, 05 à 1, 0 % de Nb, et le complément étant Zr et des impuretés accidentelles, la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm ou moins, puis à réaliser un recuit final de relaxation des contraintes sur celui-ci. Le recuit est réalisé à une température de 550°C à 850°C pendant 1 à 4 heures, de sorte que le paramètre de recuit cumulé $\Sigma A_i = \Sigma t_i \cdot \exp(-40000/T_i)$ satisfait les relations $-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15$, et $-18 \cdot 10 \cdot X_{Nb} \leq \log \Sigma A_i \leq -15 \cdot 3 \cdot 75 \cdot (X_{Nb} - 0, 2)$ dans lesquelles A_i représente le paramètre de recuit pour le i ème recuit, t_i représente la durée du recuit (en heures) pour le i ème recuit, T_i représente la température de recuit (K) pour le i ème recuit, et X_{Nb} représente la concentration en Nb (% en poids).

FR 2 769 637 - A1



CONTEXTE DE L'INVENTION1. Champ de l'invention

La présente invention a trait à un procédé pour fabriquer un alliage de Zr pour le gainage de 5 combustible de réacteur nucléaire. Le gainage en alliage de Zr possède une excellente résistance à la corrosion lorsqu'on l'expose à de l'eau chaude sous haute pression ou à de la vapeur et il possède d'excellentes propriétés de fluage.

10 2. Description de la technique apparentée

Un type général de réacteur nucléaire est un réacteur à eau pressurisé (PWR). Un tube de gainage pour un combustible de réacteur de ce type de réacteur est constitué d'un alliage de Zr. Un alliage de Zr typique 15 utilisé dans un tel tube de gainage est le Zircaloy-4 composé de (dans la suite, les pourcentages sont des pourcentages en poids), 1,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,24 % de Fe, 0,07 à 0,13 % de Cr, et le complément étant Zr et des impuretés accidentelles.

20 On a également proposé pour des tubes de gainage les alliages de Zr contenant Nb ou Nb/Ta ayant une excellente résistance à la corrosion. L'alliage de Zr contenant Nd se compose de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, et 25 le complément étant Zr et des impuretés accidentelles, dans lequel la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm ou moins. L'alliage de Zr contenant Nb/Ta se compose de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, 30 0,01 à 0,1 % de Ta, et le complément étant Zr et des impuretés accidentelles, dans lequel la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm ou moins.

35 La rentabilité d'une centrale nucléaire peut être améliorée en faisant réagir un combustible pendant une longue durée. Ceci demande d'augmenter le temps de

résistance de tube de gainage de combustible dans les réacteurs. Bien que les tubes de gainage susmentionnés constitués d'alliage de Zr contenant Nd ou contenant Nd/Ta ne possèdent pas une durabilité suffisante pour 5 satisfaire un tel besoin puisque ces alliages ne possèdent pas une résistance à la corrosion et des propriétés de fluage suffisamment élevées. Aussi y-a-t-il un besoin de tubes de gainage pour combustible nucléaire à haute durabilité.

10

RÉSUMÉ DE L'INVENTION

Les présents inventeurs ont étudié un procédé pour fabriquer un tube de gainage en alliage de Zr pour du combustible de réacteur nucléaire ayant une résistance à la corrosion et des propriétés de fluage 15 qui sont supérieures à celles des tubes de gainage classiques. Les inventeurs ont découvert qu'on améliore davantage la résistance à la corrosion et les propriétés de fluage d'un gainage en alliage de Zr obtenu à partir d'un alliage de Zr contenant Nb ou Nb/Ta classique en 20 maîtrisant les conditions du traitement thermique et plus spécifiquement la condition de recuit dans les procédés de fabrication du gainage. Ainsi, le gainage en alliage de Zr résultant peut avoir une longue durée de vie utile.

25

Un premier aspect de la présente invention est un procédé pour fabriquer un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réacteur nucléaire ayant une excellente résistance en corrosion et d'excellentes propriétés de fluage, comprenant les étapes suivantes : 30 un forgeage à chaud, un traitement thermique en solution, une extrusion à chaud et des cycles répétés de recuit et de laminage à froid d'un alliage Zr comprenant en poids de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, et le complément 35 étant Zr et des impuretés accidentelles, la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm

ou moins, puis à réaliser un recuit final de relaxation des contraintes sur celui-ci; dans lequel

le recuit est réalisé à une température de 550°C à 850°C pendant 1 à 4 heures, de sorte que le paramètre 5 de recuit cumulé ΣA_i représenté par $\Sigma A_i = \Sigma t_i \cdot \exp(-40000/T_i)$ satisfait les relations:

$$-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15, \text{ et}$$

$$-18-10 \cdot X_{Nb} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-3,75 \cdot (X_{Nb}-0,2)$$

10 dans lesquelles A_i représente le paramètre de recuit pour le i ème recuit,

t_i représente la durée du recuit (en heures) pour le i ème recuit,

15 T_i représente la température de recuit (K) pour le i ème recuit, et

X_{Nb} représente la concentration en Nb (% en poids).

Un deuxième aspect de la présente invention est un procédé pour fabriquer un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réacteur nucléaire ayant une 20 excellente résistance à la corrosion et d'excellentes propriétés de fluage, comprenant les étapes suivantes : réaliser un forgeage à chaud, un traitement thermique en solution, une extrusion à chaud et des cycles répétés de recuit et de laminage à froid d'un alliage de Zr 25 comprenant, en poids, de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, et le complément étant Zr et des impuretés accidentelles, la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm ou moins, puis à réaliser un recuit final de 30 relaxation des contraintes sur celui-ci; dans lequel

35 le recuit est réalisé dans un intervalle de températures d'environ 550°C à environ 850°C pendant 1 à 4 heures, de sorte que le paramètre de recuit cumulé ΣA_i représenté par $\Sigma A_i = \Sigma t_i \cdot \exp(-40000/T_i)$ satisfait les relations:

$$-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15, \text{ et}$$

$$-18-10.X_{Nb} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-3,75 \cdot (X_{Nb}-0,2)$$

dans lesquelles A_i représente le paramètre de recuit pour le i ème recuit,

ti représente la durée du recuit (en heures)

5 pour le ième recuit,

Ti représente la température de recuit (K) pour le $i^{\text{ème}}$ recuit, et

X_{Nb} représente la concentration en Nb (% en poids); et

10 le paramètre de recuit cumulé ΣA_i vérifie de plus les relations:

lorsque $0,05 \leq X_{Nb} \leq 0,5$,

$-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15$, et

$$-18-10.X_{Nb} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-10.(X_{Nb}-0,2), \text{ ou}$$

15 lorsque $0,5 < x_{Nb}$,

$$-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -18-2 \cdot (X_{Nb}-0,5) .$$

Un troisième aspect de la présente invention est un procédé pour fabriquer un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réacteur nucléaire ayant une excellente résistance à la corrosion et d'excellentes propriétés de fluage, comprenant les étapes suivantes : réaliser un forgeage à chaud, un traitement thermique en solution, une extrusion à chaud et des cycles répétés de recuit et de laminage à froid d'un alliage de Zr comprenant de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, et de 0,01 à 0,1 % de Ta, le complément étant Zr et des impuretés accidentnelles, la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm ou moins, puis à réaliser un recuit final de relaxation des contraintes sur celui-ci; dans lequel

le recuit est réalisé dans un intervalle de températures comprises entre environ 550°C à environ 850°C pendant environ 1 à environ 4 heures, de sorte que le paramètre de recuit cumulé ΣA_i représenté par $\Sigma A_i = \sum t_i \exp(-40000/T_i)$ satisfait les relations:

$-20 \leq \log \sum A_i \leq -15$, et

$-18-10 \cdot X_{Nb+Ta} \leq \log \sum A_i \leq -15-3,75 \cdot (X_{Nb+Ta}-0,2)$

dans lesquelles A_i représente le paramètre de recuit pour le i ème recuit,

5 t_i représente la durée du recuit (en heures) pour le i ème recuit,

T_i représente la température de recuit (K) pour le i ème recuit, et

10 X_{Nb+Ta} représente la concentration en Nb et en Ta (% en poids).

Un quatrième aspect de la présente invention est un procédé pour fabriquer un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réacteur nucléaire ayant une excellente résistance à la corrosion et d'excellentes propriétés de fluage, comprenant les étapes de réaliser un forgeage à chaud, un traitement thermique en solution, une extrusion à chaud et des cycles répétés de recuit et de laminage à froid d'un alliage de Zr comprenant de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 15 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, et de 0,01 à 0,1 % de Ta, le complément étant Zr et des impuretés accidentelles, la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm ou moins, puis à réaliser un recuit final de relaxation des contraintes sur celui-ci; dans lequel

25 le recuit est réalisé dans un intervalle de températures comprises entre environ 550°C et environ 850°C pendant environ 1 à environ 4 heures, de sorte que le paramètre de recuit cumulé $\sum A_i$ représenté par $\sum A_i = 30 \sum t_i \cdot \exp(-40000/T_i)$ satisfait les relations:

$-20 \leq \log \sum A_i \leq -15$, et

$-18-10 \cdot X_{Nb+Ta} \leq \log \sum A_i \leq -15-3,75 \cdot (X_{Nb+Ta}-0,2)$

dans lesquelles A_i représente le paramètre de recuit pour le i ème recuit,

35 t_i représente la durée du recuit (en heures) pour le i ème recuit,

T_i représente la température de recuit (K) pour le i ème recuit, et

X_{Nb+Ta} représente la concentration en Nb et Ta (%) pp); et

5 le paramètre de recuit cumulé ΣA_i vérifie de plus les relations:

lorsque $0,05 \leq X_{Nb+Ta} \leq 0,5$,

$-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15$, et X_{Nb+Ta}

$-18-10 \cdot X_{Nb+Ta} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-10 \cdot (X_{Nb+Ta}-0,2)$, et

10 lorsque $0,5 < X_{Nb+Ta}$,

$-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -18-2 \cdot (X_{Nb+Ta}-0,5)$.

Dans ces aspects, il est préférable que le recuit avant le laminage à froid final soit réalisé dans un intervalle de températures compris entre environ 15 650°C et environ 770°C pendant environ 1 à environ 10 minutes suivi par une trempe à l'aide d'argon gazeux.

De plus, dans ces aspects, il est préférable que ces étapes soient effectuées successivement.

Un cinquième aspect de la présente invention est 20 un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réacteur nucléaire ayant une excellente résistance à la corrosion et d'excellentes propriétés de fluage, fabriqué à l'aide d'un des procédés décrits ci-dessus.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

25 La figure 1 est graphique qui représente l'intervalle des conditions de recuit d'un procédé pour faire un gainage en alliage de Zr selon la présente invention; et

30 La figure 2 est graphique qui représente l'intervalle des conditions de recuit d'un procédé pour faire un gainage en alliage de Zr selon la présente invention.

DESCRIPTION DES MODES DE RÉALISATION PRÉFÉRÉS

En général, on produit un gainage en alliage de 35 Zr pour un combustible de réacteur nucléaire à travers des étapes de fusion, de forgeage de lingot, de

traitement thermique en solution, d'extrusion à chaud, de cycles répétés de recuit et de laminage à froid, de recuit avant un laminage à froid final, un laminage à froid final puis un recuit final de relaxation des 5 contraintes.

Le forgeage de lingot est un forgeage à chaud pour décomposer la structure de la coulée et on le réalise dans un intervalle de températures comprises entre environ 800°C et environ 1 100°C. On réalise le 10 traitement thermique en solution en maintenant l'alliage forgé dans l'intervalle de températures comprises entre environ 1 000°C et environ 1 100°C puis en le refroidissant avec de l'eau de sorte à éliminer une ségrégation microscopique des éléments dans l'alliage. 15 Dans l'extrusion à chaud, on chauffe l'alliage de Zr à une température comprise dans l'intervalle d'environ 600°C à environ 800°C et on l'extrude pour former un tube sans soudure. On réalise le recuit après l'extrusion à chaud et avant le laminage à froid 20 ultérieur, généralement dans un four sous vide. On réalise généralement le laminage à froid ultérieur à l'aide d'un laminoir à pas de pèlerin dans le cas du gainage en alliage de Zr. Le recuit final de relaxation des contraintes s'effectue généralement dans 25 l'intervalle de températures comprises entre environ 450°C et environ 500°C pendant environ 1 à environ 4 heures de manière à relaxer la contrainte dans le gainage en alliage de Zr.

Le procédé pour fabriquer le gainage en alliage 30 de Zr selon la présente invention se caractérise de la manière suivante. Lorsque l'alliage possède une composition de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, et le complément étant Zr et des impuretés accidentielles, et lorsque la 35 teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle est de 60 ppm ou moins, on réalise les recuits après

l'extrusion à chaud et avant le laminage final à froid de manière à satisfaire les conditions décrites dans le premier ou le deuxième aspect susmentionné. Lorsque l'alliage possède une composition (dans la suite en 5 pourcentages pondéraux), de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, 0,01 à 0,1 % de Ta, et que le complément est Zr et des impuretés accidentelles, et lorsque la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle est de 60 ppm ou moins, 10 on réalise les recuits après l'extrusion à chaud et avant le laminage final à froid de manière à satisfaire les conditions décrites dans le troisième ou le quatrième aspect susmentionné.

Le paramètre de recuit cumulé $\Sigma A_i = \sum t_i \cdot \exp(-40000/T_i)$ doit satisfaire la relation $-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15$. Lorsque $-20 \leq \log \Sigma A_i$, le gainage de tuyau en alliage de Zr est complètement recuit par les étapes répétées de recuit. Puisque les étapes de recuit répétés doivent être réalisés dans la région de la phase α -zirconium, on doit satisfaire à $\log \Sigma A_i \leq -15$.

Le paramètre de recuit cumulé ΣA_i est fortement affecté par la concentration en Nb (X_{Nb}) et par la concentration totale en Nb+Ta (X_{Nb+Ta}). Ainsi, on doit également satisfaire les conditions suivantes:

25 $-18-10 \cdot X_{Nb} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-3,75 \cdot (X_{Nb}-0,2)$ pour l'alliage de Zr contenant Nb, ou bien

$-18-10 \cdot X_{Nb+Ta} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-3,75 \cdot (X_{Nb+Ta}-0,2)$ pour l'alliage de Zr contenant Nb/Ta, les concentrations X_{Nb} et X_{Nb+Ta} étant représentées en pourcentages pondéraux.

30 On préfère que le paramètre de recuit cumulé ΣA_i pour l'alliage de Zr contenant Nb soit défini en de plus amples détails dans ce qui suit, parce qu'il dépend de manière significative des concentrations X_{Nb} .

Lorsque $0,05 \leq X_{Nb} \leq 0,5$, on réalise le recuit de 35 manière à satisfaire les relations:

$-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15$, et

$-18-10 \cdot X_{Nb} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-10 \cdot (X_{Nb}-0,2)$, ou lorsque $0,5 < X_{Nb}$, on réalise le recuit de manière à satisfaire les relations:

$$-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -18-2 \cdot (X_{Nb}-0,5).$$

5 De manière similaire, on préfère que le paramètre de recuit cumulé ΣA_i pour l'alliage de Zr contenant Nb/Ta soit défini en de plus amples détails de la manière suivante:

10 Lorsque $0,5 \leq X_{Nb+Ta} \leq 0,5$, on réalise le recuit de manière à satisfaire les relations:

$$-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15, \text{ et}$$

$$-18-10 \cdot X_{Nb+Ta} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-10 \cdot (X_{Nb+Ta}-0,2), \text{ ou}$$

lorsque $0,5 < X_{Nb+Ta}$, on réalise le recuit de manière à satisfaire les relations:

$$15 \quad -20 \leq \log \Sigma A_i \leq -18-2 \cdot (X_{Nb+Ta}-0,5).$$

La figure 1 est un graphique présentant une gamme de recuits préférés pour produire un gainage en alliage de Zr contenant Nb pour du combustible de réacteur nucléaire. L'alliage de Zr contenant Nb possède une composition de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, et le complément étant Zr et des impuretés accidentelles, la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm ou moins. Dans la figure 1, l'axe horizontal indique $\log \Sigma A_i$ et l'axe vertical indique la concentration en Nb (X_{Nb}). On fixe les coordonnées des points A, B, C, D, E, F, G, H, et I de la manière suivante:

$$30 \quad A(\log \Sigma A_i = -15, X_{Nb} = 0,05)$$

$$B(\log \Sigma A_i = -15, X_{Nb} = 0,2)$$

$$C(\log \Sigma A_i = -18, X_{Nb} = 1,0)$$

$$D(\log \Sigma A_i = -20, X_{Nb} = 1,0)$$

$$E(\log \Sigma A_i = -20, X_{Nb} = 0,2)$$

$$F(\log \Sigma A_i = -18,5, X_{Nb} = 0,05)$$

$$35 \quad G(\log \Sigma A_i = -18, X_{Nb} = 0,5)$$

$$H(\log \Sigma A_i = -19, X_{Nb} = 1,0) \text{ et}$$

I($\log \sum A_i = -20$, $X_{Nb} = 0,5$)

La gamme de recuit dans le procédé pour fabriquer le gainage de Zr contenant Nb selon le premier aspect de la présente invention est définie par le 5 domaine entouré par les droites AB, BC, CD, DE, EF, et FA dans la figure 1.

La gamme de recuit dans le procédé pour fabriquer le gainage de Zr contenant Nb selon le deuxième aspect de la présente invention est définie par 10 le domaine entouré par les droites AB, BG, GI, IE, EF et FA pour $0,05 \leq X_{Nb} \leq 0,5$ ou les domaines entourés par les droites GH, HD, DI et IG pour $0,5 < X_{Nb}$.

La figure 2 est un graphique présentant une gamme de recuits préférés pour produire un gainage en 15 alliage de Zr contenant Nb/Ta pour du combustible de réacteur nucléaire. L'alliage de Zr contenant Nb/Ta possède une composition de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, 20 0,01 à 0,1 % de Ta, et le complément étant Zr et des impuretés accidentelles, dans lequel la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm ou moins. Dans la figure 2, l'axe horizontal indique $\log \sum A_i$ et l'axe vertical indique la concentration totale en Nb et en Ta (X_{Nb+Ta}). On fixe les coordonnées des points J, 25 K, L, M, N, O, P, Q, et R de la manière suivante:

J($\log \sum A_i = -15$, $X_{Nb+Ta} = 0,05$)

K($\log \sum A_i = -15$, $X_{Nb+Ta} = 0,2$)

L($\log \sum A_i = -18$, $X_{Nb+Ta} = 1,0$)

M($\log \sum A_i = -20$, $X_{Nb+Ta} = 1,0$)

N($\log \sum A_i = -20$, $X_{Nb+Ta} = 0,2$)

O($\log \sum A_i = -18,5$, $X_{Nb+Ta} = 0,05$)

P($\log \sum A_i = -18$, $X_{Nb+Ta} = 0,5$)

Q($\log \sum A_i = -19$, $X_{Nb+Ta} = 1,0$) et

R($\log \sum A_i = -20$, $X_{Nb+Ta} = 0,5$)

35 La gamme de recuit dans le procédé pour fabriquer le gainage de Zr contenant Nb/Ta selon le

troisième aspect de la présente invention est définie par le domaine entouré par les droites JK, KL, LM, MN, NO, et OJ dans la figure 2.

La gamme de recuit dans le procédé pour 5 fabriquer le gainage de Zr contenant Nb/Ta selon le quatrième aspect de la présente invention est définie par le domaine entouré par les droites JK, KP, PR, RN, RN et OJ pour $0,05 \leq X_{Nb+Ta} \leq 0,5$ ou les domaines entourés par les droites PQ, QM, MR et RP pour $0,5 < X_{Nb+Ta}$.

10 Dans les modes de réalisation plus particulièrement préférés du procédé pour fabriquer le gainage en alliage de Zr selon la présente invention, en satisfaisant les conditions de recuit indiquées dans la figure 1 ou la figure 2, le recuit avant le laminage 15 final à froid se réalise dans un intervalle de températures compris entre environ 650°C et environ 770°C pendant une durée courte de manière significative de 1 à 10 minutes, puis on trempe le gainage avec de l'argon gazeux. Pour réaliser un tel recuit, on 20 introduit un volume réduit de gainage dans un récipient que l'on maintient essentiellement à une température élevée donnée pour chauffer rapidement le gainage puis on introduit de l'argon gazeux de grande pureté dans le récipient pour refroidir rapidement le gainage.

25 On décrit à présent les motifs de limitation de la gamme de composition de l'alliage de Zr selon la présente invention.

(A) Sn

30 L'étain (Sn) améliore la résistance de l'alliage lorsque sa teneur est de 0,2 % ou plus. D'autre part, la résistance à la corrosion de l'alliage diminue de manière significative lorsque la teneur est supérieure à 1,7 %. Ainsi, la teneur en Sn est fixée entre 0,2 et 1,7 %.

35 (B) Fe et Cr

Une combinaison de ces composants contribue à améliorer la résistance à la corrosion et les propriétés de fluage de l'alliage lorsque la teneur en Fe est de 0,18 % ou plus et que la teneur en Cr est de 0,07 % ou plus. Toutefois, la résistance à la corrosion diminue de manière significative lorsque la teneur en Fe est supérieure à 0,6 % et que la teneur en Cr est supérieure à 0,4 %. Ainsi, la teneur en Fe est fixée entre 0,18 et 0,6 % et la teneur en Cr est fixée entre 0,07 et 0,4 %.

10 (C) Nb et Ta

Ces composants contribuent à améliorer davantage la résistance à la corrosion et les propriétés de fluage de l'alliage lorsque la teneur en Nb est de 0,05 % ou plus ou que la teneur en Ta est de 0,01 % ou plus.

15 Toutefois, la résistance à la corrosion diminue de manière significative lorsque la teneur en Nb est supérieure à 1,0 % et que la teneur en Ta est supérieure à 0,1 %. Ainsi, la teneur en Nb est fixée entre 0,05 et 1,0 %, et la teneur en Ta est fixée entre 0,01 et 0,1 %.

20 (D) N en tant qu'impureté accidentelle

L'azote (N) est un composant nuisible de manière significative et il détériore la résistance à la corrosion de l'alliage. Puisque la résistance à la corrosion diminue de manière significative lorsque la teneur en N est supérieure à 60 ppm, la limite supérieure de la teneur en N est fixée à 60 ppm.

On va à présent décrire en de plus amples détails le procédé pour fabriquer le gainage en alliage de Zr pour un combustible de réacteur nucléaire selon la 30 présente invention en se basant sur ce qui suit.

EXEMPLES

On a préparé de la manière suivante des lingots d'alliage de Zr de 1 à 64 ayant des compositions indiquées dans les tableaux 1 à 6. On a mélangé une éponge de Zr ayant une pureté de 99,8 % et Sn, Fe, Cr, Nb et Ta granulaire ayant chacun une pureté de 99,9 % ou

plus en se basant sur les compositions pour former des électrodes. On a fondu les électrodes dans un four à arc sous vide du type à électrode consommable en vue de former des lingots d'alliage de Zr.

5

Tableau 1

Type	Composition (% en poids) (Complément: Zr et impuretés accidentielles)						
	Sn	Fe	Cr	Nb	Ta	N (ppm)	
Lingot en alliage Zr	1	1,13	0,22	0,11	0,053	-	32
	2	1,02	0,22	0,10	0,11	-	29
	3	1,66	0,21	0,11	0,21	-	25
	4	1,21	0,21	0,11	0,22	-	30
	5	0,95	0,183	0,11	0,21	-	34
	6	0,97	0,37	0,11	0,20	-	28
	7	0,99	0,58	0,11	0,19	-	31
	8	1,01	0,21	0,075	0,20	-	26
	9	0,92	0,21	0,20	0,22	-	33
	10	0,97	0,21	0,38	0,21	-	29
	11	0,98	0,44	0,23	0,22	-	30

Tableau 2

Type	Composition (% en poids)						
	(Complément: Zr et impuretés accidentnelles)						
	Sn	Fe	Cr	Nb	Ta	N (ppm)	
Lingot en alliage Zr	12	0,94	0,58	0,39	0,20	-	35
	13	0,75	0,20	0,10	0,19	-	32
	14	0,49	0,187	0,11	0,22	-	33
	15	0,49	0,39	0,11	0,21	-	27
	16	0,49	0,57	0,11	0,19	-	41
	17	0,49	0,21	0,078	0,20	-	30
	18	0,49	0,21	0,22	0,21	-	55
	19	0,49	0,21	0,39	0,20	-	28
	20	0,49	0,41	0,22	0,20	-	25
	21	0,49	0,58	0,38	0,22	-	31
	22	0,24	0,21	0,11	0,20	-	34

Tableau 3

Type	Composition (% en poids)						
	(Complément: Zr et impuretés accidentnelles)						
	Sn	Fe	Cr	Nb	Ta	N (ppm)	
Lingot en alliage Zr	23	0,85	0,20	0,09	0,36	-	26
	24	0,77	0,184	0,11	0,49	-	33
	25	0,81	0,38	0,11	0,48	-	29
	26	0,80	0,57	0,11	0,47	-	30
	27	0,80	0,19	0,075	0,49	-	57
	28	0,79	0,19	0,20	0,48	-	40
	29	0,77	0,19	0,36	0,49	-	31
	30	0,78	0,41	0,20	0,47	-	28
	31	0,81	0,58	0,37	0,49	-	33
	32	0,49	0,20	0,11	0,49	-	30
	33	0,21	0,183	0,11	0,48	-	28

Tableau 4							
Type	Composition (% en poids) (Complément: Zr et impuretés accidentielles)						
	Sn	Fe	Cr	Nb	Ta	N (ppm)	
Lingot en alliage Zr	34	0,22	0,38	0,11	0,49	-	27
	35	0,20	0,57	0,11	0,48	-	31
	36	0,21	0,20	0,076	0,49	-	30
	37	0,22	0,20	0,19	0,49	-	35
	38	0,23	0,20	0,38	0,48	-	27
	39	0,21	0,40	0,21	0,49	-	29
	40	0,22	0,59	0,38	0,49	-	32
	41	0,77	0,21	0,11	0,75	-	28
	42	0,52	0,21	0,11	0,75	-	27
	43	1,01	0,19	0,10	0,98	-	33
	44	0,23	0,19	0,10	0,99	-	35

Tableau 5

Type	Composition (% en poids) (Complément: Zr et impuretés accidentnelles)						
	Sn	Fe	Cr	Nb	Ta	N (ppm)	
Lingot en alliage Zr	45	1,15	0,21	0,10	0,051	0,013	25
	46	1,65	0,20	0,10	0,15	0,06	29
	47	0,95	0,183	0,11	0,16	0,05	28
	48	0,97	0,38	0,12	0,12	0,09	35
	49	0,97	0,57	0,09	0,18	0,02	31
	50	0,99	0,20	0,074	0,15	0,05	56
	51	1,01	0,20	0,19	0,13	0,08	45
	52	0,96	0,21	0,39	0,17	0,02	34
	53	0,98	0,43	0,21	0,14	0,06	27
	54	0,97	0,59	0,38	0,11	0,09	30
	55	0,25	0,20	0,10	0,15	0,05	31

Tableau 6

Type	Composition (% en poids) (Complément: Zr et impuretés accidentnelles)						
	Sn	Fe	Cr	Nb	Ta	N (ppm)	
Lingot en alliage Zr	56	0,79	0,182	0,11	0,48	0,01	28
	57	0,77	0,37	0,12	0,43	0,05	26
	58	0,81	0,58	0,12	0,41	0,08	33
	59	0,80	0,20	0,073	0,47	0,02	52
	60	0,79	0,21	0,21	0,44	0,05	28
	61	0,80	0,20	0,37	0,40	0,08	40
	62	0,78	0,43	0,19	0,45	0,03	29
	63	0,79	0,57	0,36	0,43	0,06	30
	64	0,26	0,20	0,11	0,93	0,05	32

EXEMPLE 1

On a fait subir un forgeage à 1 010°C à des
 5 lingots d'alliage de Zr, 1 à 64, indiqués dans les
 tableaux 1 à 6, afin de décomposer la structure de la
 coulée, à un chauffage à 1 010°C, à une trempe avec de
 l'eau pour un traitement thermique en solution, à un
 usinage à la machine pour éliminer le tartre à base
 10 d'oxyde, une extrusion à chaud à 600°C, un usinage à la
 machine pour éliminer le tartre à base d'oxyde, trois
 cycles de recuit et de laminage à froid dans les
 conditions de $\log \Sigma A_i$ indiquées dans les tableaux 7 à 12
 et un recuit final de relaxation des contraintes à 450°C
 15 pendant 2 heures. On a produit des tubes de gainage en
 alliage de Zr, 1 à 64, ayant une épaisseur de 0,5 mm. On
 a soumis les tubes de gainage résultants aux tests
 suivants.

Test de corrosion

On a découpé une épreuve d'essai ayant une longueur de 50 mm à partir de chaque gainage en alliage de Zr, on l'a lavée avec de l'acétone et on l'a immergée dans de l'eau pure d'une tension de vapeur saturée de 190 atmosphères à 360°C pendant 900 jours dans un autoclave statique. On indique dans les tableaux 7 à 12 le poids accru de chaque éprouvette par unité de surface [(poids après les essais - poids avant les essais)/ surface de l'éprouvette] (unité: mg/dm²).

Essai de fluage

On a mis sous pression de manière interne chaque éprouvette d'essai provenant du gainage en alliage de Zr et on l'a maintenue à une température de 400°C pendant 15 jours sous une contrainte de 12 kg/mm². On a mesuré le diamètre extérieur de l'éprouvette avec un calibre à laser pour diamètre. On a calculé la déformation de fluage (en %) à partir de l'augmentation du diamètre externe en utilisant l'équation [(diamètre extérieur après les essais - diamètre extérieur avant les essais)/diamètre extérieur avant les essais] x 100. On indique également les résultats dans les tableaux 7 à 12.

EXEMPLE 2

On a soumis les lingots en alliage de Zr, 1 à 64, indiqués dans les tableaux 1 à 6, à un forgeage à 1 010°C afin de décomposer la structure de la coulée, à un chauffage à 1 010°C, à une trempe avec de l'eau pour un traitement thermique en solution, à un usinage à la machine pour éliminer le tartre à base d'oxyde, à une extrusion à chaud à 600°C, à un usinage à la machine pour éliminer le tartre à base d'oxyde, à deux cycles de recuit et de laminage à froid dans les conditions de log₁₀AI indiquées dans les tableaux 13 à 21, à un chauffage et à un refroidissement avec de l'argon gazeux dans les conditions indiquées dans les tableaux 13 à 21,

à un laminage final à froid puis à un recuit final de relaxation des contraintes dans les mêmes conditions que dans l'exemple 1. On a produit des tubes de gainage en alliage de Zr, 65 à 128, ayant une épaisseur de 0,5 mm.

5 On a soumis les tubes de gainage résultants à l'essai de corrosion et à l'essai de fluage comme dans l'exemple 1. On indique également les résultats dans les tableaux 13 à 21.

Tel que décrit ci-dessus, le gainage en alliage de Zr obtenu par le procédé selon la présente invention possède une excellente résistance à la corrosion et d'excellentes propriétés de fluage, en conséquence on peut l'utiliser comme gainage de combustible nucléaire pendant une longue durée.

Tableau 7

Type	Lingot en alliage de Zr	ΣAi	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
Procédé de cette invention	1	1	-16,8	294
	2	2	-16,8	198
	3	3	-16,0	234
	4	4	-15,1	233
	5	5	-17,9	185
	6	6	-16,8	171
	7	7	-16,0	171
	8	8	-15,1	202
	9	9	-17,9	189
	10	10	-16,8	191
	11	11	-16,0	189

Tableau 8

Type	Lingot en alliage de Zr	ΣA_i	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
Procédé de cette invention	12	12	-15,1	206
	13	13	-16,8	162
	14	14	-16,0	150
	15	15	-16,8	141
	16	16	-16,8	135
	17	17	-16,8	149
	18	18	-16,8	159
	19	19	-16,8	163
	20	20	-16,8	151
	21	21	-17,9	152
	22	22	-16,0	133

Tableau 9

Type	Lingot en alliage de Zr	ΣAi	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
Procédé de cette invention	23	23	-17,9	246
	24	24	-17,9	251
	25	25	-17,9	243
	26	26	-17,9	240
	27	27	-17,9	255
	28	28	-17,9	262
	29	29	-17,9	267
	30	30	-17,9	249
	31	31	-17,9	266
	32	32	-17,9	234
	33	33	-17,9	212
				2,81

Tableau 10

Type	Lingot en alliage de Zr	ΣA_i	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
Procédé de cette invention	34	34	-17,9	208
	35	35	-17,9	202
	36	36	-17,9	216
	37	37	-17,9	221
	38	38	-17,9	223
	39	39	-17,9	204
	40	40	-17,9	210
	41	41	-17,9	291
	42	42	-17,9	290
	43	43	-18,8	294
	44	44	-18,8	250

Tableau 11

Type	Lingot en alliage de Zr	$\Sigma \Delta i$	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
Procédé de cette invention	45	45	-16,8	284
	46	46	-17,9	241
	47	47	-17,9	180
	48	48	-17,9	177
	49	49	-17,9	171
	50	50	-17,9	180
	51	51	-17,9	193
	52	52	-17,9	201
	53	53	-17,9	192
	54	54	-17,9	188
	55	55	-16,8	129

Tableau 12

Type	Lingot en alliage de Zr	ΣA_i	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
Procédé de cette invention	56	56	-17,9	248
	57	57	-17,9	233
	58	58	-17,9	252
	59	59	-17,9	261
	60	60	-17,9	260
	61	61	-17,9	264
	62	62	-17,9	252
	63	63	-17,9	281
	64	64	-17,9	248

Tableau 13

Type	Lingot en alliage de Zr	Σ Al	Condition de recuit avant le laminage final à froid		Durée de maintien (min)	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
			Température de chauffage (°C)				
Procédé de cette invention	65	1	-17,8	720	5,2	289	2,98
	66	2	-17,8	725	3,0	226	2,93
	67	3	-19,5	670	2,2	291	2,83
	68	4	-18,8	675	5,0	239	2,85
	69	5	-18,8	680	6,1	220	2,91
	70	6	-18,8	700	3,0	212	2,84
	71	7	-18,8	720	1,2	207	2,81

Tableau 14

Type	Lingot en alliage de Zr	Σ Al	Condition de recuit avant le laminage final à froid		Durée de maintien (min)	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
			Température de chauffage (°C)				
Procédé de cette invention	72	8	-17,8	730	2,5	188	2,88
	73	9	-17,8	690	8,3	191	2,89
	74	10	-18,8	660	5,5	234	2,82
	75	11	-17,8	740	2,3	192	2,84
	76	12	-17,8	770	1,0	194	2,88
	77	13	-17,8	710	9,5	175	2,99
	78	14	-17,8	725	3,0	159	2,98

Tableau 15

Type	Lingot en alliage de Zr	Σ Ai	Condition de recuit avant le laminage final à froid		Durée de maintien (min)	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
			Température de chauffage (°C)				
Procédé de cette invention	79	15	-17,8	720	5,5	143	2,94
	80	16	-17,8	760	1,8	133	2,92
	81	17	-17,8	700	9,8	155	2,97
	82	18	-18,8	680	4,5	194	2,93
	83	19	-17,8	730	5,0	169	2,99
	84	20	-17,8	735	4,5	155	2,98
	85	21	-17,9	720	5,0	161	2,93

Tableau 16

Type	Lingot en alliage de Zr	Σ Al	Condition de recuit avant le laminage final à froid		Durée de maintien (min)	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
			Température de chauffage (°C)				
Procédé de cette invention	86	22	-17,8	720	5,0	133	2,97
	87	23	-17,8	700	8,8	243	2,85
	88	24	-17,8	710	8,0	260	2,72
	89	25	-17,8	730	3,2	251	2,64
	90	26	-17,8	725	3,5	250	2,71
	91	27	-17,8	760	1,0	259	2,77
	92	28	-17,8	750	1,2	277	2,75

Tableau 17

Type	Lingot en alliage de Zr	Σ Al	Condition de recuit avant le laminage final à froid		Durée de maintien (min)	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de flUAGE après l'essai de flUAGE %
			Température de chauffage (°C)				
Procédé de cette invention	93	29	-17,8	710	5,0	275	2,67
	94	30	-17,8	700	9,0	266	2,71
	95	31	-17,8	730	2,5	281	2,73
	96	32	-17,8	720	5,0	241	2,81
	97	33	-17,8	740	1,1	222	2,88
	98	34	-17,8	730	2,6	223	2,82
	99	35	-17,8	720	4,8	201	2,89

Tableau 18

Type	Lingot en alliage de Zr	Σ Al	Condition de recuit avant le laminage final à froid		Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluege après l'essai de fluege %	
			Température de chauffage (°C)	Durée de maintien (min)			
Procédé de cette invention	100	36	-17,8	725	3,3	223	2,81
	101	37	-17,8	710	5,0	225	2,82
	102	38	-17,8	700	7,5	220	2,79
	103	39	-17,8	740	1,2	207	2,81
	104	40	-17,8	720	4,0	221	2,83
	105	41	-18,8	650	8,1	282	2,94
	106	42	-18,8	680	2,0	249	2,85

Tableau 19

Type	Lingot en alliage de Zr	Σ Al	Condition de recuit avant le laminage final à froid		Durée de maintien (min)	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
			Température de chauffage (°C)				
Procédé de cette invention	107	43	-18,8	690	1,0	299	2,82
	108	44	-18,8	660	5,0	262	2,91
	109	45	-17,8	720	4,0	283	2,94
	110	46	-17,8	725	3,0	242	2,66
	111	47	-17,8	730	2,5	182	2,91
	112	48	-17,8	710	7,0	174	2,81
	113	49	-17,8	730	3,0	176	2,79

Tableau 20

Type	Lingot en alliage de Zr	Σ Al	Condition de recuit avant le laminage final à froid		Durée de maintien (min)	Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
			Température de chauffage (°C)				
Procédé de cette invention	114	50	-17,8	735	2,0	182	2,72
	115	51	-17,8	710	5,2	188	2,88
	116	52	-17,8	715	4,5	201	2,76
	117	53	-17,8	720	3,8	197	2,79
	118	54	-17,8	700	9,0	189	2,84
	119	55	-17,8	705	5,5	142	2,98
	120	56	-17,8	725	2,0	247	2,76

Tableau 21

Type	Lingot en alliage de Zr	Σ Ai	Condition de recuit avant le laminage final à froid		Augmentation de poids par unité de surface de l'éprouvette d'essai après l'essai de corrosion (mg/dm ²)	Déformation de fluage après l'essai de fluage %
			Température de chauffage (°C)	Durée de maintien (min)		
Procédé de cette invention	121	57	-17,8	730	2,0	232
	122	58	-18,8	670	3,5	190
	123	59	-17,8	695	9,0	255
	124	60	-17,8	715	4,0	249
	125	61	-17,8	730	2,2	272
	126	62	-17,8	720	3,0	272
	127	63	-17,8	725	2,6	287
	128	64	-18,8	680	2,5	267

R E V E N D I C A T I O N S

1. Procédé pour fabriquer un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réacteur nucléaire comprenant les étapes suivantes: réaliser un forgeage à 5 chaud, un traitement thermique en solution, une extrusion à chaud et des cycles répétés de recuit et de laminage à froid d'un alliage de Zr comprenant, en poids, de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, et le complément étant 10 Zr et des impuretés accidentelles, la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm ou moins, puis à réaliser un recuit final de relaxation des contraintes sur celui-ci; dans lequel

ledit recuit est réalisé dans un intervalle de 15 températures comprises entre environ 550°C et environ 850°C pendant environ 1 à environ 4 heures, de sorte que le paramètre de recuit cumulé ΣA_i représenté par $\Sigma A_i = \Sigma t_i \cdot \exp(-40\ 000/T_i)$ satisfait les relations:

20 $-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15$, et
 $-18 - 10 \cdot X_{Nb} \leq \log \Sigma A_i \leq -15 - 3,75 \cdot (X_{Nb} - 0,2)$
 dans lesquelles A_i représente le paramètre de recuit pour le i ème recuit,
 t_i représente la durée du recuit (en heures) pour le i ème recuit,
 25 T_i représente la température de recuit (K) pour le i ème recuit, et
 X_{Nb} représente la concentration en Nb (% en poids).

30 2. Procédé selon la revendication 1 tel que le recuit avant le laminage à froid final soit réalisé dans un intervalle de températures comprises entre environ 650°C et environ 770°C pendant environ 1 à environ 10 minutes suivi pas une trempe à l'aide d'argon gazeux.

35 3. Procédé pour fabriquer un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réacteur nucléaire

comportant les étapes suivantes: réaliser un forgeage à chaud, un traitement thermique en solution, une extrusion à chaud et des cycles répétés de recuit et de laminage à froid d'un alliage de Zr comportant, en 5 poids, de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, et le complément étant Zr et des impuretés accidentelles, la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm ou moins, puis à réaliser un recuit final de relaxation des 10 contraintes sur celui-ci; dans lequel

le dit recuit est réalisé dans un intervalle de températures comprises entre environ 550°C et environ 850°C pendant environ 1 à environ 4 heures, de sorte que le paramètre de recuit cumulé ΣA_i représenté par $\Sigma A_i = 15 \sum t_i \exp(-40000/T_i)$ satisfait les relations:

$$-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15, \text{ et}$$

$$-18-10 \cdot X_{Nb} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-3,75 \cdot (X_{Nb}-0,2)$$

dans lesquelles A_i représente le paramètre de recuit pour le i ème recuit,

20 t_i représente la durée du recuit (en heures) pour le i ème recuit,

T_i représente la température de recuit (K) pour le i ème recuit, et

25 X_{Nb} représente la concentration en Nb (% en poids) et

le paramètre de recuit cumulé ΣA_i vérifie de plus les relations:

lorsque $0,05 \leq X_{Nb} \leq 0,5$,

30 $-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15$, et

$-18-10 \cdot X_{Nb} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-10 \cdot (X_{Nb}-0,2)$, ou

lorsque $0,5 < X_{Nb}$,

$-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -18-2 \cdot (X_{Nb}-0,5)$.

4. Procédé selon la revendication 3 tel que le recuit avant le laminage à froid final soit réalisé dans 35 un intervalle de températures comprises entre environ

650°C et environ 770°C pendant environ 1 à environ 10 Minutes suivi pas une trempe à l'aide d'argon gazeux.

5. Procédé pour fabriquer un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réacteur nucléaire comprenant les étapes suivantes: réaliser un forgeage à chaud, un traitement thermique en solution, une extrusion à chaud et des cycles répétés de recuit et de laminage à froid d'un alliage de Zr comprenant, en poids, de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 10 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, et 0,01 à 0,1 % de Ta et le complément étant Zr et des impuretés accidentelles, la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm ou moins, puis à réaliser un recuit final de relaxation des contraintes sur celui- 15 ci; dans lequel

le dit recuit est réalisé dans un intervalle de températures comprises entre environ 550°C et environ 850°C pendant environ 1 à environ 4 heures, de sorte que le paramètre de recuit cumulé ΣA_i représenté par $\Sigma A_i = 20 \Sigma t_i \exp(-40000/T_i)$ satisfait les relations:

$$-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15, \text{ et}$$

$$-18-10.X_{Nb+Ta} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-3,75.(X_{Nb+Ta}-0,2)$$

dans lesquelles A_i représente le paramètre de recuit pour le i ème recuit,

25 t_i représente la durée du recuit (en heures) pour le i ème recuit,

T_i représente la température de recuit (K) pour le i ème recuit, et

30 X_{Nb+Ta} représente la concentration en Nb et Ta (% en poids).

6. Procédé selon la revendication 5 tel que le recuit avant le laminage à froid final soit réalisé dans un intervalle de températures comprises entre environ 650°C et environ 770°C pendant environ 1 à environ 10 Minutes suivi pas une trempe à l'aide d'argon gazeux.

7. Procédé pour fabriquer un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réacteur nucléaire comprenant les étapes suivantes: réaliser un forgeage à chaud, un traitement thermique en solution, une 5 extrusion à chaud et des cycles répétés de recuit et de laminage à froid d'un alliage de Zr comprenant, en poids, de 0,2 à 1,7 % de Sn, 0,18 à 0,6 % de Fe, 0,07 à 0,4 % de Cr, 0,05 à 1,0 % de Nb, et 0,01 à 0,1 % de Ta et le complément étant Zr et des impuretés 10 accidentelles, la teneur en azote en tant qu'impureté accidentelle étant de 60 ppm ou moins, puis à réaliser un recuit final de relaxation des contraintes sur celui-ci; dans lequel

ledit recuit est réalisé dans un intervalle de 15 températures comprises entre environ 550°C et environ 850°C pendant environ 1 à environ 4 heures, de sorte que le paramètre de recuit cumulé ΣA_i représenté par $\Sigma A_i = \sum t_i \cdot \exp(-40\ 000/T_i)$ satisfait les relations:

20 $-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15$, et
 $-18-10 \cdot X_{Nb+Ta} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-3,75 \cdot (X_{Nb+Ta}-0,2)$
dans lesquelles A_i représente le paramètre de recuit pour le i ème recuit,

25 t_i représente la durée du recuit (en heures) pour le i ème recuit,

T_i représente la température de recuit (K) pour le i ème recuit, et

X_{Nb+Ta} représente la concentration en Nb et Ta (% en poids) et

30 le paramètre de recuit cumulé ΣA_i vérifie de plus les relations:

lorsque $0,05 \leq X_{Nb+Ta} \leq 0,5$,
 $-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -15$, et
 $-18-10 \cdot X_{Nb+Ta} \leq \log \Sigma A_i \leq -15-10 \cdot (X_{Nb+Ta}-0,2)$, ou
lorsque $0,5 < X_{Nb+Ta}$,
35 $-20 \leq \log \Sigma A_i \leq -18-2 \cdot (X_{Nb+Ta}-0,5)$.

8. Procédé selon la revendication 7 tel que le recuit avant le laminage à froid final soit réalisé dans un intervalle de températures comprises entre environ 650°C et environ 770°C pendant environ 1 à environ 10
5 Minutes suivi pas une trempe à l'aide d'argon gazeux.

9. Un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réaction nucléaire selon la revendication 1.

10. Un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réaction nucléaire selon la revendication 2.

11. Un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réaction nucléaire selon la revendication 3.

15 12. Un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réaction nucléaire selon la revendication 4.

20 13. Un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réaction nucléaire selon la revendication 5.

14. Un gainage en alliage de Zr pour un combustible de réaction nucléaire selon la revendication 6.

